

MICROMECHANISMOS DE FALLO DE ACEROS ESTRUCTURALES DURANTE LA GALVANIZACIÓN EN CALIENTE

J. CARPIO, DPTO. DE TRANSPORTES, TECNOLOGÍA DE PROYECTOS Y PROCESOS, ETSI CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA; J.A. CASADO, J.A. ÁLVAREZ, F. GUTIÉRREZ-SOLANA, DIVISIÓN DE CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES, ETSI CAMINOS, CANALES Y PUERTOS, UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.

Este artículo presenta un modelo que explica las diferentes etapas que ocurren en un proceso de fallo de un acero estructural durante la galvanización en caliente en discontinuo, desde la etapa de fluxado hasta la rotura total de la pieza o la parada de fisura. El modelo describe el proceso como un fallo por metal líquido, ayudado por el efecto fragilizante del hidrógeno, catalizador de las reacciones hierro-zinc. Se distingue entre dos casos, uno en el que el baño de galvanización tiene más de un 0,5% de Sn, en el que se forma el compuesto intermetálico FeSn en el frente de fisura, y otro en el que el contenido de Sn en el baño de metal líquido es menor a ese 0,5%, en el que se forman las fases Fe-Zn habituales. Se imponen dos condiciones mecánicas para que se produzca el fallo, que el factor de intensidad de tensiones sea creciente y a la vez superior al umbral, K_{Isc} . Esas restricciones mecánicas sirven como criterio para dar algunas recomendaciones a galvanizadores para evitar el fallo, y también para reevaluar la bondad de recomendaciones de otras fuentes bibliográficas que han surgido en los últimos años, y de las que se hace un pequeño resumen.

Introducción

El fallo durante la galvanización de aceros estructurales es un problema que se detectó por primera vez en Alemania en los años 50[1], aunque es en los años 80 cuando desde Japón empiezan a hacerse estudios sistemáticos sobre el mismo [2]. El fallo consiste en la aparición de grietas en aceros estructurales hasta 500 MPa de límite elástico durante su galvanización en caliente en discontinuo (consistente en la inmersión de la pieza en Zn líquido a 450 °C). Dichos fallos son ocasionales y asistemáticos y sólo ocurren durante la galvanización. Es decir, una pieza de acero que no se haya fragilizado durante el proceso de galvanización no se fragilizará después y presenta las mismas propiedades que una pieza sin galvanizar.

Este fallo no debe confundirse con el fallo por hidrógeno que

aparece en piezas galvanizadas de acero de alta resistencia (límite elástico > 600 MPa), cuyo origen es el hidrógeno absorbido durante las fases de decapado y fluxado (inmersiones en ácido) de preparación superficial previa a la galvanización. Este tipo de fallos ha sido convenientemente tratado por las normas ASTM, especialmente la ASTM A123 [3] (cuya primera versión surgió en 1928) e ISO, especialmente la ISO 1461 [4]. Los aceros estructurales afectados por fallo durante la galvanización tienen estructura ferrítico perlítica, poco susceptibles a fragilización por hidrógeno. Además, Donnay ha demostrado que un aumento de la agresividad del decapado apenas tiene influencia en el aumento del fallo durante la galvanización de los aceros estructurales, gracias a los inhibidores utilizados habitualmente en dicha etapa [5].

A partir de los años 90 se produjo un repunte de los casos

de fallo durante la galvanización, en paralelo a la aparición de nuevos baños de galvanización, que además del aditivo habitual de un 1% de Pb en el baño de Zn, incluían un 1% de Sn y un 0,1% de Bi, que se utilizaban para controlar mejor el espesor de los recubrimientos de Zn cuando se galvanizaban aceros calados al Si, procedentes de horno eléctrico de arco. A raíz de este aumento en los casos de fallo, en Norteamérica y en Europa aparecieron grandes proyectos de investigación que trataron de resolver el problema [5-9]. Estos proyectos se centraron mucho en resolver el problema a gran escala, en eliminar las grietas de los componentes estructurales. Aunque han hecho avances en la comprensión de los fenómenos que dan lugar al fallo durante la galvanización, estableciendo que se trata de un proceso de corrosión bajo tensión debido a metal líquido, en el que no está clara la influencia del hidrógeno procedente de las etapas previas a la galvanización (el decapado y el fluxado), no han sido capaces de elaborar un modelo que explique los micromecanismos por los que tiene lugar el fallo durante la galvanización.

La presentación de ese modelo es el objetivo de este artículo, basándose en el trabajo experimental de años ya expuesto por los autores en otros artículos [10-13], en una Tesis Doctoral [14], y también en otras fuentes bibliográficas independientes.

Modelo de mecanismo de fallo durante la galvanización en caliente

Se trata de un modelo por etapas que explica cómo ocurre el fallo durante la galvanización desde el comienzo del fluxado (etapa inmediatamente previa a la inmersión en Zn líquido) hasta la parada de fisura o rotura total de la pieza. Se tienen en cuenta, además, dos casos. Aquel en el que el baño de galvanización tiene un contenido en Sn mayor del 0,5% y aquel en el que el contenido del baño en dicho elemento es menor a ese 0,5%. A continuación se realiza la presentación de las etapas del modelo.

2.1. Fluxado

En la Figura 1 se representa esquemáticamente lo que ocurre en la etapa de fluxado.

En contra de lo que se creía habitualmente en industria, los autores demostraron en [11] que las reacciones de activación entre las sales de fluxado y el acero base que son necesarias para la galvanización, descritas en [15], tienen lugar desde el instante inicial del fluxado, a temperatura ligeramente superior a la ambiente, no en la galvanización a 45 °C. Estas reacciones producen la formación de depósitos de fases Fe-Zn en la superficie del acero, aumento de la rugosidad superficial del mismo, lo que puede ser el origen de futuros defectos a partir de los cuales se produzca fisuración, y un aumento de la concentración de hidrógeno en la superficie del acero. Según el mismo artículo [11], no parece que el hidrógeno pase en una cantidad significativa al interior del acero debido al corto tiempo del fluxado (10-15 minutos) y a la estructura ferrítico perlítica del acero.

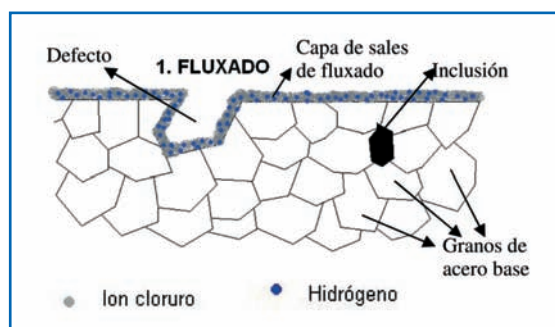


Figura 1. Esquema del primer paso del modelo de fallo durante la galvanización.

2.2. Inmersión en el baño de galvanización

En la Figura 2 se muestra de forma esquemática lo que ocurre en esta segunda fase del modelo.

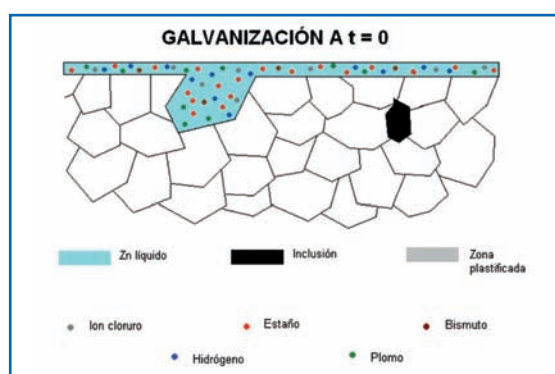


Figura 2. Esquema del segundo paso del modelo de fallo durante la galvanización.

El contacto del acero base con el metal líquido a 45 °C tiene tres efectos inmediatos que pueden afectar al proceso de fallo durante la galvanización:

- El acero estructural aumenta su temperatura de forma brusca, con lo que, como se demostró en [11], se reducen sus valores de resistencia y ductilidad hasta aproximadamente un 30 %.
- Tal y como describe la bibliografía técnica sobre el tema [15, 16], las sales de fluxado al pasar a 450 °C en Zn líquido se 'queman', acelerándose las reacciones comentadas en el punto 2.1 anterior. Sin embargo, tal y como se muestra en [13, 14], es habitual que queden restos de sales de fluxado sin reaccionar, quedando por lo tanto grandes cantidades de hidrógeno en zonas adyacentes a defectos en la superficie del acero a galvanizar, que continuarán acelerando las reacciones Fe-Zn en esos puntos, tal y como hacen en el proceso global de galvanización.
- Según Feldmann [9], debido a que el acero está a una temperatura mucho más fría que el metal líquido, de forma temporal se produce una 'congelación' del metal líquido justo en contacto con el acero base, hasta que el dicho acero alcance la temperatura del baño. Este efecto de congelación puede ser beneficioso ya que evita el contacto entre el acero base y el metal líquido fragilizante durante un tiempo en el que tienen lugar importantes tensiones en el acero base debido al choque térmico. En los pasos siguientes de este modelo se tomará el caso desfavorable (del lado de la seguridad) en el que ese efecto de congelación no es relevante para evitar el fallo durante la galvanización.



PLEGADORA SERIE SYNCRO

La plegadora Syncro, es un avance más sobre la sólida base de las máquinas fabricadas por Axial, ofreciendo cada vez, más posibilidades y equipamiento, con el fin de asegurarle el mejor resultado en su trabajo.

Alta tecnología aplicada, mecanismos de gran precisión, así como grandes facilidades de manejo y programación, garantizan la máxima perfección.



CIZALLA SERIE CPN

Axial cuida, al más mínimo detalle, el diseño innovador de la cizalla CPN.

Sus formas y acabados representan un importante avance en el concepto de la maquinaria.

Aspectos técnicos y complementos añadidos, completan las altas prestaciones de esta serie.





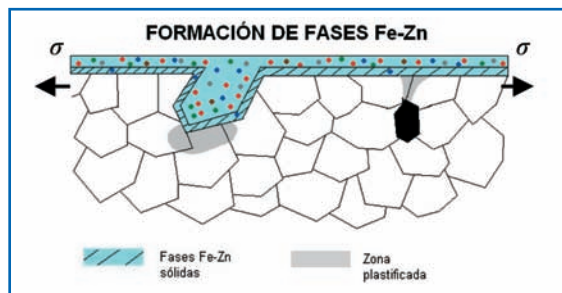
Línea automática de plegado: 2 plegadoras en tándem, 3000 toneladas y 16 metros.



2.3. Formación de fases Fe-Zn

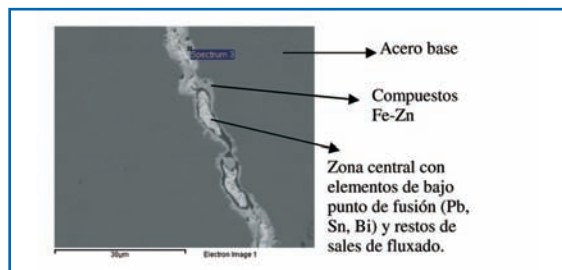
En la Figura 3 se muestra de forma esquemática lo que ocurre en la tercera etapa del modelo.

Figura 3. Esquema del tercer paso del modelo de fallo durante la galvanización.



En este paso lo que se produce es la formación habitual de las fases Fe-Zn, según lo expuesto por Marder [16], mientras tiene lugar una tensión en el sistema por choque térmico. La baja solubilidad de los elementos de bajo punto de fusión del baño de galvanización (Pb, Sn, Bi, etc.) en dichas fases Fe-Zn [17] hace que en la parte central de los pequeños defectos del acero base suba la concentración de dichos elementos, formándose un metal líquido de punto de fusión más bajo y, por lo tanto, más corrosivo. Esto se ha comprobado experimentalmente en diversos casos reales [5] y en laboratorio [13]. Véase un ejemplo en la Figura 4.

Figura 4. Distribución de fases del recubrimiento de galvanización que rellena una fisura del acero [14].

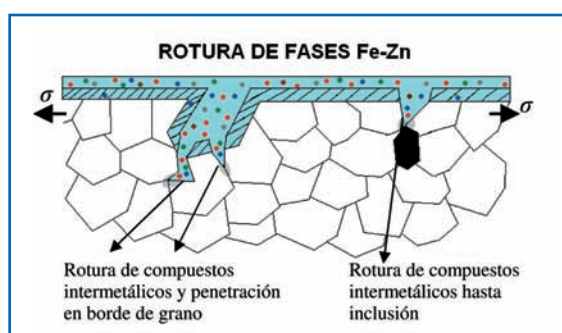


También se ha comprobado en [12] que, a pesar de la tensión del sistema, mientras no se produzca que el factor de intensidad de tensiones K_I no supere el umbral K_{Isc} o, aun superándolo, no sea creciente, no se producirá la rotura de las fases Fe-Zn y no se producirá la propagación del defecto o fisura inicial.

2.4. Rotura de las fases Fe-Zn

En la Figura 5 se muestra de forma esquemática lo que ocurre en la cuarta etapa del modelo.

Figura 5. Esquema del cuarto paso del modelo de fallo durante la galvanización.



Si se producen las condiciones citadas en el apartado anterior, que el factor de intensidad de tensiones K_I supere al valor umbral (para que se puedan romper las fases Fe-Zn) y sea creciente (para que se abran vías de penetración de más metal líquido), se producirá la propagación de la fisura. Debido a que K_I es creciente, y siguiendo las teorías clásicas de fragilización por metal líquido [18], que aquí se asumen, se producirá un enroscamiento del frente de fisura que permita la aparición de más metal base fresco, preferentemente en borde de grano (en este caso borde de subgrano ferrítico [12, 13]), que reaccionará con más metal líquido procedente de la fisura abierta. El proceso de fisuración continuará repitiendo de forma cíclica los pasos 3 y 4 del modelo, tal y como muestra la Figura 9 al final del artículo, mientras K_I sea superior al umbral, creciente y además la concentración de Sn en el baño de galvanización o en el frente de fisura sea menor a 0,5%.

2.5. Formación del compuesto FeSn

En la Figura 6 se muestra de forma esquemática la quinta etapa del modelo.

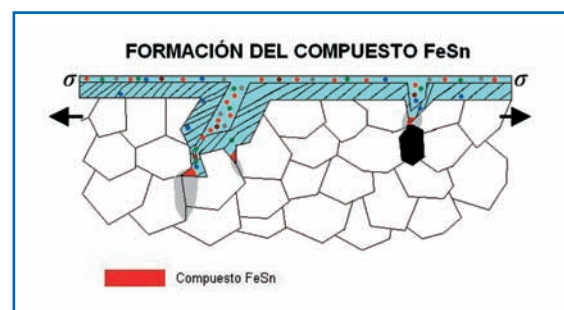


Figura 6. Esquema del quinto paso del modelo de fallo durante la galvanización.

Según la información que nos da el diagrama de fases ternario Fe-Zn-Sn a 450 °C [19], si se supera la concentración de 0,5% de Sn en un sistema Fe-Zn, se produce un equilibrio entre el Fe, la fase Fe-Zn denominada y el compuesto intermetálico FeSn. Por lo tanto, en el fondo de un defecto o fisura de un acero que se está galvanizando, donde tiende a aumentar la concentración de Sn, según lo explicado en 2.3, llegará un momento en que se empiece a formar el compuesto FeSn en vez de las fases habituales Fe-Zn. Esto se ha comprobado experimentalmente, como puede apreciarse en la Figura 7.

2.6. Rotura del compuesto FeSn

En la Figura 8 se muestra de forma esquemática la sexta y última etapa del modelo de fallo durante la galvanización. El FeSn es un material de una dureza de 500-700 HV, mayor a la de las fases Fe-Zn, y cristaliza en un sistema hexagonal muy rígido [20], por lo que teóricamente ha de presentar una mayor fragilidad que dichas fases Fe-Zn en el proceso de fallo durante la galvanización. El efecto, según los experimentos presentados en [11, 12], la tenacidad a fractura de probetas CT de acero sumergidos en baño de Zn líquido a

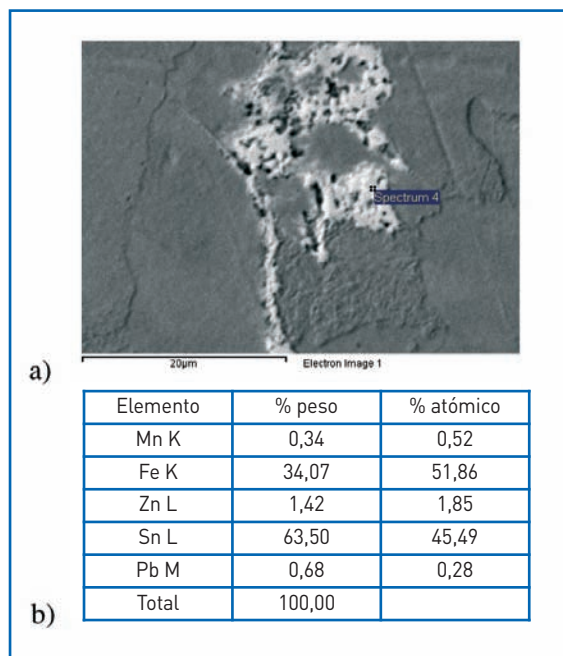


Figura 7. a) Micrografía y b) Análisis del fondo de fisura de un caso real de fallo durante la galvanización[13].

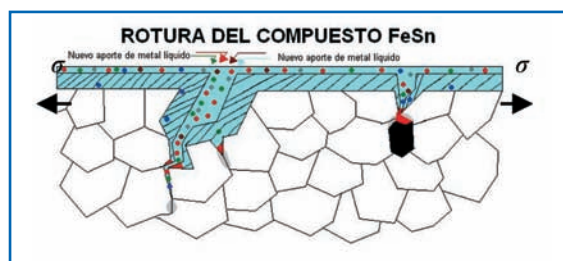


Figura 8. Esquema del quinto paso del modelo de fallo durante la galvanización.

450 °C con un 1% de Sn era menor a la tenacidad de las probetas sumergidas en un baño sin Sn o, alternativamente, el fallo se producía en un tiempo menor. Al examinar las fractografías de las probetas ensayadas en baño con un 1% Sn aparecía el compuesto FeSn, y donde no se había utilizado Sn sólo aparecían fases Fe-Zn.

Como se comenta en el apartado 2.4 y en la Figura 9 al final del artículo, en un fallo durante la galvanización en un baño con más de un 0,5% de Sn la fisuración continuará repitiendo de forma cíclica los pasos 5 y 6 del modelo hasta que se produzca la rotura total de la pieza o hasta que KI deje de ser creciente.

Conclusiones y recomendaciones

En este artículo se ha presentado un modelo de mecanismo de fallo durante la galvanización, cuyo resumen se muestra en la Figura 9 a continuación. Se trata de un modelo de corrosión bajo tensión debido a metal líquido, en el que el hidrógeno actúa como catalizador, es decir, acelerante del fallo. Se consideran dos casos. El primero de ellos es que el baño de galvanización tenga menos de un 0,5% de Sn, en cuyo caso sólo se han de aplicar los 4 primeros pasos del modelo, y el segundo es que el baño tenga más de un 0,5% de Sn, caso en que hay que aplicar los 6 pasos.

Se impone como condicionante mecánico que para se

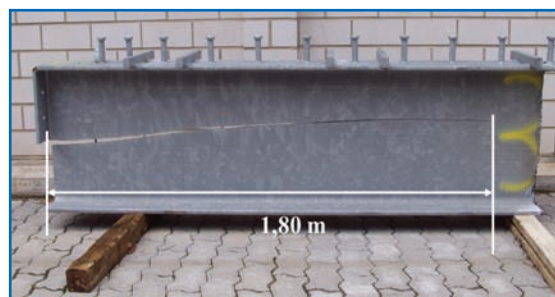
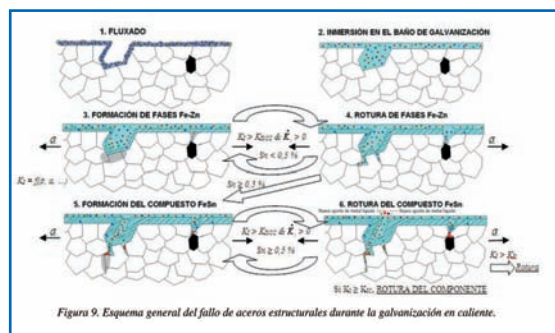


Figura 9. Esquema general del fallo de aceros estructurales durante la galvanización en caliente.

Conviene insistir en la necesidad de elegir aceros de alto grado de tenacidad, con superficies lo más lisas posible y no prolongar el contacto del metal base con el Zn líquido más allá de lo necesario. Foto: Pinger, T., Feldmann, M. 'Cracking during HDG of large steel members'. Ponencia presentada en la '1ª Reunión Técnica sobre el proyecto Famega'. Corus RDT. Sheffield, Reino Unido, Enero 2004.

produzca el fallo el factor de intensidad de tensiones KI ha de ser mayor a un umbral K_{Isc} y además ha de ser creciente. Estos dos condicionantes, junto con la composición del baño de galvanización en Sn, sirven como criterio para evaluar si las recomendaciones dadas a los galvanizadores para evitar el fallo durante la galvanización, recomendaciones que venían de la experiencia en experimentos a gran escala, están fundadas teóricamente o no. Cualquier recomendación encontrada en cualquier guía (por ejemplo [21, 22]) ha de facilitar que KI deje de ser creciente o mayor que un umbral.

En general las recomendaciones en [21, 22] y de otras guías similares [5], aunque no se dedujeron del estudio de los micromecanismos de fallo sino de experiencias a gran escala sí cumplen con las citadas condiciones. A estas recomendaciones habría que añadir las siguientes específicas del modelo desarrollado en este artículo.

- No superar un contenido en Sn del baño mayor de 0,5% en la galvanización de estructuras de responsabilidad. Otras recomendaciones ponían este límite entre un 0,15-0,3% para el Sn, por lo que se quedaban del lado de la seguridad.
- Limitar el contenido de Pb a no más del 1% y eliminar el Bi en estructuras con responsabilidad.
- Evitar fluxados agresivos que, como se ha visto en este artículo, agravan el problema del fallo durante la galvanización.

Y, aunque estas recomendaciones ya venían en otras recopilaciones, conviene insistir en que se han de elegir aceros de alto grado de tenacidad, con superficies lo más lisas posible y no prolongar el contacto del metal base con el Zn líquido más allá del tiempo necesario para que el recubrimiento alcance el mínimo exigido por la norma ISO 1461. /

Referencias

Las referencias de este artículo pueden consultarse en el siguiente enlace: www.interempresas.net/A117176

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Comisión Europea y al Ministerio de Ciencia e Innovación Español (actual Ministerio de Economía y Competitividad) la financiación del proyecto FAMEGA, que constituye el trabajo base para la realización de este modelo. También desea agradecer la ayuda y el material prestado a las empresas Corus-Tata y Arcelor-Mittal y al resto de socios del proyecto Famega.